

Schallemissionsanalyse zur Untersuchung des Schädigungsverhaltens im Auszugversuch eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns*

Bong-Gu Kang¹, Joachim Hannawald², Wolfgang Brameshuber³

Zusammenfassung: Zur Untersuchung der Schädigungs- und Versagensmechanismen eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns im Auszugversuch wurde die Schallemissionsanalyse zur Identifizierung und Lokalisierung von Filamentbrüchen eingesetzt. Im ersten Schritt wurden dazu die Schall emittierenden Ursachen (Filamentriss, Filamentablösung und Mikroriss im Beton) für eine Differenzierung charakterisiert. Es wurden Versuche zur Erzeugung von isolierten Signalen durchgeführt, welche mit Hilfe der Signal- und Frequenzanalyse untersucht wurden. Bei dem durchgeführten Garnauszugversuch konnte eine hohe Lokalisierungsgenauigkeit der Filamentbrüche erzielt werden. Der Schädigungsverlauf des Garns während des Auszugversuchs konnte detailliert untersucht werden.

Summary: To analyse the damage and failure mechanisms of a multifilament yarn embedded in concrete during a pullout test the acoustic emission analysis was carried out for the identification and localisation of filament ruptures. In a first step, the different damage mechanisms (filament rupture, filament debonding and concrete micro cracking) causing acoustic emission were characterised for separation. Tests were carried out to generate isolated signals, which were studied using signal and frequency analysis. A high localization accuracy of the filament ruptures in the yarn pullout test could be achieved. The damage progress of the yarn during the pullout test could be analysed in detail.

* Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244045098499-20524](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244045098499-20524)

¹ Dipl.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen

² Dr.-Ing. Dipl.-Phys., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen

³ Prof. Dr.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen

1 Einleitung

Für eine sichere Bemessung von textilbewehrtem Beton ist es erforderlich, das Tragverhalten hinreichend zu studieren. Aus diesem Grund werden die Schädigungs- und Versagensmechanismen eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns während eines Auszugversuchs untersucht. Aufgrund einer unvollständigen Penetration des Betons in die heterogene Struktur des Multifilamentgarns, liegen unterschiedliche Verbundzustände und somit unterschiedliche Belastungen der Filamente vor, die zu einem sukzessiven Versagen der Filamente führen (BANHOLZER [1]). Um diese sukzessiven Filamentbrüche zu beobachten, wurde der so genannte FILT (Failure Investigation using Light Transmission property) Test entwickelt. Es wird die lichtleitende Eigenschaft von Glas genutzt, um Filamentbrüche während des Auszugversuchs zu identifizieren. Hiermit ist es möglich, das Versagen der Filamente qualitativ im Querschnitt zu ermitteln. Um jedoch auch Filamentbrüche quantitativ zu ermitteln und zudem räumlich zu lokalisieren, wurde die Schallemissionsanalyse in REINHARDT ET AL. [2] eingeführt. In Bild 1 ist das Prinzip der Schallemissionsanalyse skizziert.

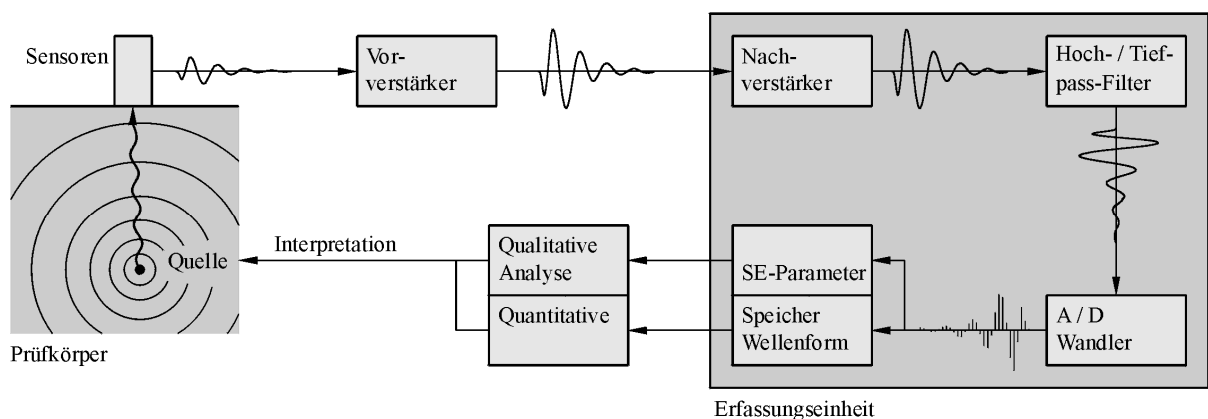


Bild 1: Prinzipskizze Schallemissionsanalyse (Quelle: KÖPPEL [3])

Fig. 1: Principle sketch of the acoustic emission analysis (Source: KÖPPEL [3])

Beim Bruch eines Filaments wird gespeicherte elastische Verformungsenergie teilweise in Form einer Schallemission freigesetzt, welche als Körperwellen an die Oberfläche des Probekörpers gelangt. Die verursachte Oberflächenverschiebung bzw. Oberflächenbeschleunigung wird mit Hilfe von piezoelektrischen Beschleunigungssensoren in elektrische Signale umgewandelt. Nachdem die auftretenden Störgeräusche durch Frequenzfilterung eliminiert worden sind, werden die analogen Signale zur weiteren Verarbeitung und Analyse digitalisiert und gespeichert. Die räumliche Lokalisierung der Schallquellen (siehe Bild 2) basiert auf der Bestimmung der Schalllaufzeitdifferenzen zwischen Quelle und verschiedenen Empfängern. Hierbei wird unter Annahme einer konstanten, bekannten Schallausbreitungsge-

schwindigkeit c des Mediums ein Zusammenhang zwischen Laufzeit t_i und Distanz d_i zu jedem Empfänger aufgestellt.

$$t_i = t + \frac{1}{c} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1)$$

Um die vier Unbekannten x , y , z und t zu bestimmen, sind mindestens vier Sensoren notwendig. Da es keine geschlossene Lösung für ein daraus resultierendes, nichtlineares Gleichungssystem gibt, müssen iterative Verfahren angewendet werden, um die Schallquelle zu lokalisieren. Die hieraus resultierenden Laufzeitresiduen Δt geben einen Anhalt über die Qualität der Lokalisierung.

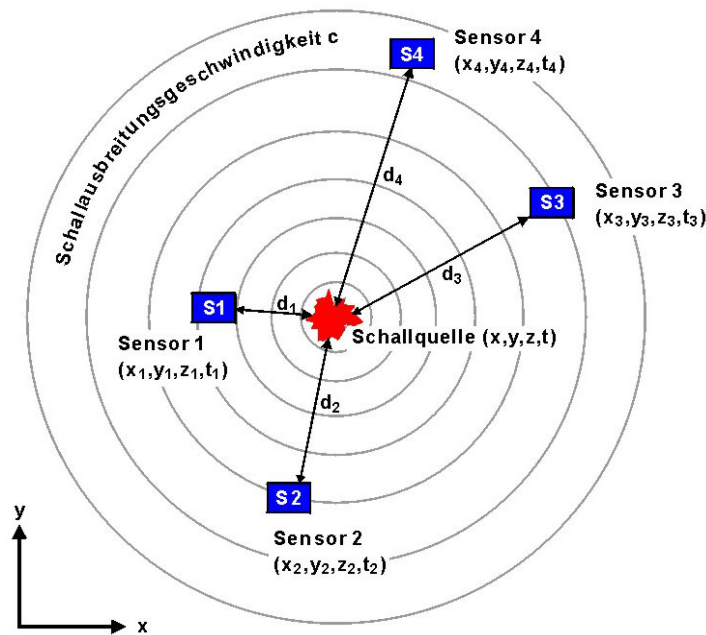


Bild 2: Schematische Darstellung von der Lokalisierung der Schallquelle

Fig. 2: Schematic illustration of the localisation of the acoustic source

Die Lokalisierung der in Garnauszugversuchen aufgezeichneten Schallereignisse konnte mit einer Genauigkeit von 1 bis 3 mm erfolgen (KANG ET AL. [4]). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass bei kleineren Probenabmessungen bei gleicher Einbettungslänge bessere Lokalisierungsgenauigkeiten erzielt werden. Durch die kleinere Schalllaufzeit bei kleineren Proben sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Überlappung unterschiedlicher Schallereignisse, welche zu nicht eindeutigen Lokalisierungen und somit zu größeren Fehlern führt. Aufgrund der Sensorabmessung ist eine sinnvolle minimale Probenabmessung von 50 x 50 x 30 mm³ gewählt worden. Die maximale aufnehmbare Ereignisrate ist größer als 1000 Hz, d.h., es können mehr als 1000 Schallereignisse pro Sekunde aufgezeichnet werden.

Da Schallemissionen nicht nur durch Filamentbrüche verursacht werden, sondern auch andere Ursachen, wie das Ablösen des Verbunds oder Mikrorisse in der Betonmatrix, hierfür verantwortlich sein können, ist im ersten Schritt eine Differenzierung der unterschiedlichen Schallemissionsursachen erforderlich (Abschnitt 2).

Anschließend können Filamentbrüche im Garnauszugversuch mit der Schallemissionsanalyse separat identifiziert werden. Zur Beschreibung der Schädigungs- und Versagensmechanismen und für die Verifizierung von Simulationsmodellen wird eine räumliche Lokalisierung der Filamentbrüche durchgeführt (Abschnitt 3).

In Bild 3a ist das für die Untersuchung verwendete Textil 2D-10-07 bestehend aus unbeschichteten Rovings mit 2400 tex dargestellt. Durch die textile Verarbeitung wird das in Hauptlastrichtung liegende Garn (0° Richtung) mit Wirkfäden umwickelt, so dass die Form des ursprünglichen Rovings (siehe Bild 3b) und somit auch die Betonpenetrationseigenschaft wesentlich verändert werden.

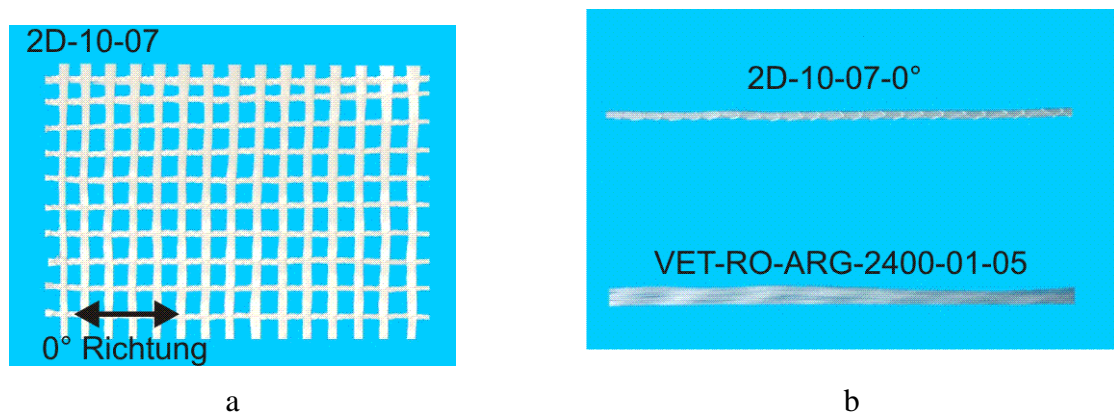


Bild 3: a) Textil 2D-10-07, b) Extrahiertes Garn aus Textil und Roving von der Spule

Fig. 3: a) Textile 2D-10-07, b) Extracted yarn from textile and roving from the spool

Um das Tragverhalten der Garne im Textil zu untersuchen, wurden extrahierte Garne aus dem Textil 2D-10-07 für die vorliegende Untersuchung verwendet. Die Zusammensetzung des verwendeten Feinbetons PZ-0899-01 ist in BROCKMANN [5] aufgeführt.

2 Charakterisierung der Schall emittierenden Ursachen

2.1 Versuchsbeschreibung

Um die einzelnen Schallemissionsursachen unterscheiden zu können, müssen definierte Schallereignisse isoliert betrachtet werden. Hierzu wurden Auszugversuche an in Beton eingebetteten Einzelfilamenten (siehe Bild 4) zur Erzeugung von isolierten Filamentbrüchen

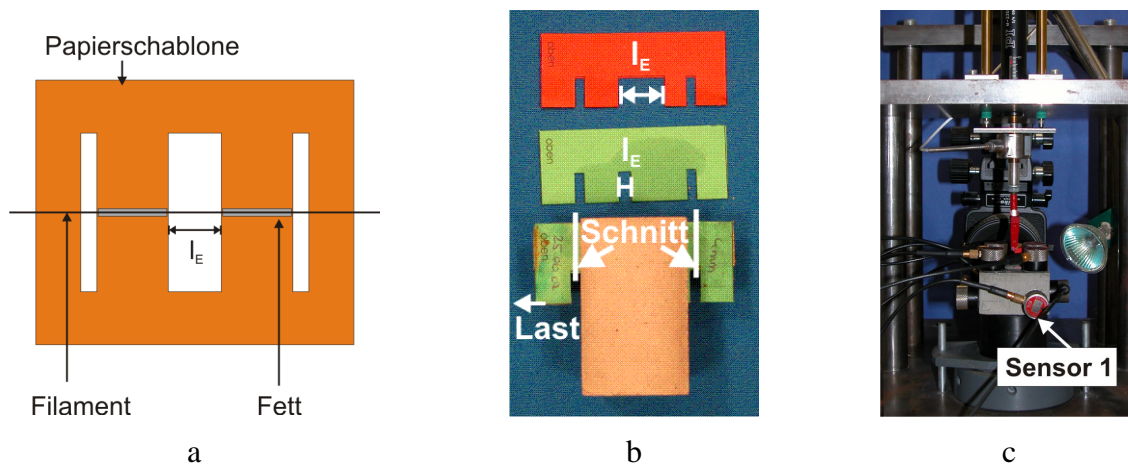


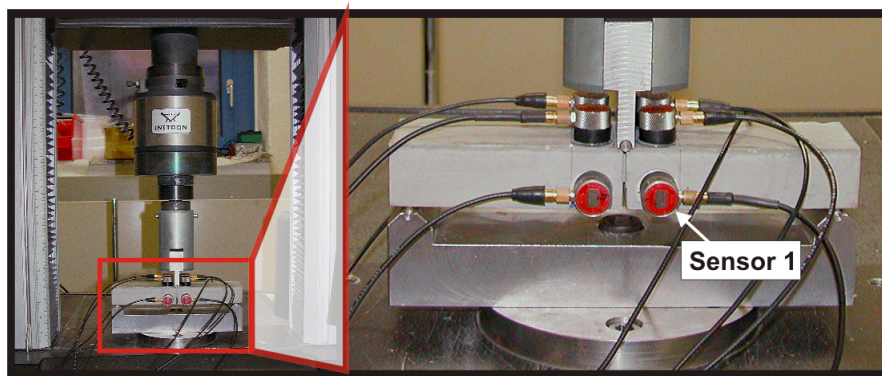
Bild 4: a) Papierschablone, b) Betonkörper mit Einzelfilament, c) Versuchsaufbau

Fig. 4: a) Cardboard, b) Concrete specimen with a single filament, c) Test set-up

bzw. Filamentablösungen (Filamentauszug) – der Versagensmechanismus wird über die Einbettungslänge l_E gesteuert – durchgeführt. Mit Hilfe einer Papierschablone ist das Filament bereichsweise in Papier eingehüllt, so dass das Filament nur im freien Bereich in der Mitte l_E mit Beton in Kontakt kommt. Um Reibung des Filaments mit der Papierschablone zu minimieren, ist dieser Bereich leicht gefettet. Die Einbettungslänge zur Erzeugung eines Filamentbruchs bzw. einem Filamentauszug wurde zu 10 bzw. 3 mm gewählt. Es wurden jeweils 8 Proben untersucht. Die Probekörpergeometrie und Anordnung der Sensoren wurden analog zu den Garnauszugversuchen gewählt, um die gleiche Bedingung für die Aufnahme von isolierten Schallereignissen zu gewährleisten. Die gleichen Bedingungen sind notwendig, um beispielsweise die Schallemissionsintensitäten miteinander vergleichen zu können.

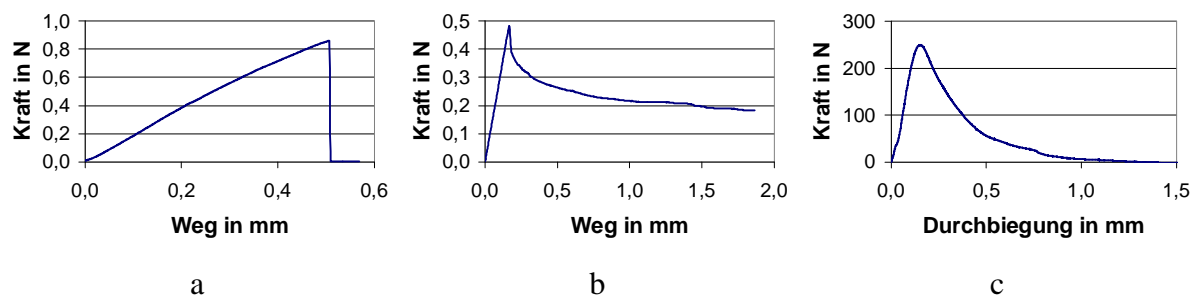
Zur Erzeugung der Mikrorisse in der Betonmatrix wurden Biegezugversuche an gekerbten Proben durchgeführt. Durch die kleine Stützweite bei der gewählten Probekörperabmessung von $50 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$ konnte in Voruntersuchungen kein stabiles Risswachstum erreicht werden. Somit war es erforderlich, die Probekörpergeometrie zu verändern. In Bild 5 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die Probekörperabmessung beträgt $220 \times 50 \times 30 \text{ mm}^3$. Die Stützweite wurde zu 200 mm gewählt. Da schon bei einem Versuch eine ausreichende Anzahl an Schallereignissen zu erwarten ist, wurde lediglich eine Probe untersucht. Die Probe wurde unten und an den Seiten 10 mm tief eingekerbt. Um auch hier die gleichen Bedingungen im Hinblick auf die Schallintensität wie im Garnausziehversuch zu erreichen, wurden die Sensoren weitestgehend analog zum Garnausziehversuch angeordnet.

Die Einstellungen für die Schallemissionsanalyse sowie die Prüfgeschwindigkeiten sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Aufgrund der höheren Schallemissionsintensität von Filamentbrüchen ist hierfür eine kleinere Vorverstärkung sowie ein größerer Triggerlevel gewählt worden.

**Bild 5:** Versuchsaufbau der Biegezugprüfung**Fig. 5:** Test set-up of the bending test**Tabelle 1:** Einstellungen für die Schallemissionsanalyse und Prüfgeschwindigkeiten**Table 1:** Settings for the acoustic emission analysis and testing velocity

Parameter	Einheit	Filamentbruch	Filamentablösung	Mikroriss
Vorverstärkung	Faktor	100	1000	1000
Aufnahmefrequenz	MHz	10	10	10
Blocklänge	Sample	8192	8192	8192
Pretrigger	Sample	410	410	410
Triggerlevel	V	0,1	0,01	0,01
Prüfgeschwindigkeit	mm/min	0,1	0,1 bzw. 0,5	0,01

In Bild 6 sind exemplarisch die Kraft-Weg- bzw. Kraft-Durchbiegungskurven dargestellt.

**Bild 6:** a, b) Kraft-Weg Diagramme des Filamentauszugversuchs mit Filamentbruch und Filamentablösung, c) Kraft-Durchbiegung Diagramm des Biegezugversuchs**Fig. 6:** a, b) Force-displacement diagrams of the filament pullout test with filament rupture and filament pullout, c) Force deflection diagram of the bending test

Beim Filamentbruch konnte stets ein eindeutiges Schallereignis aufgezeichnet werden. Obwohl ein kleinerer Triggerlevel beim Filamentauszug eingestellt worden war, wurden während des Versuchs für keine der untersuchten Proben Schallemissionen gemessen. Der Biegezugversuch ergab 461 Schallereignisse.

2.2 Signal- und Frequenzanalyse

Für die folgenden Auswertungen wurden die unterschiedlichen Vorverstärkungen berücksichtigt, so dass die ursprüngliche, nicht verstärkte Intensität als Amplitude dargestellt ist. In Bild 7 sind exemplarisch die Zeitsignale der Schallereignisse eines Filamentbruchs und eines Mikrorisses jeweils für Sensor 1 dargestellt. Eine wesentlich geringere Amplitude kann für den Mikroriss beobachtet werden. Dies zeigt sich auch an der Auswertung der über alle 8 Sensoren gemittelten Maximalamplituden in Bild 8 (ein Punkt stellt ein Schallereignis dar).

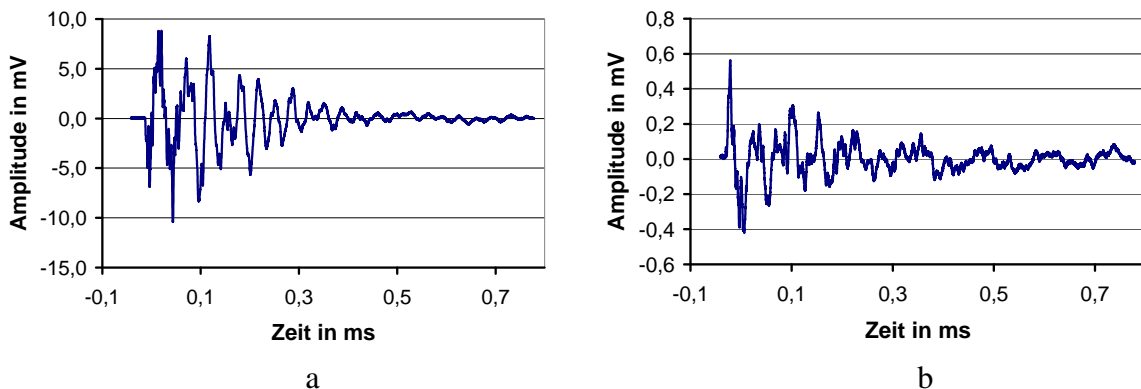


Bild 7: a) Zeitsignal Sensor 1: Filamentbruch, b) Mikroriss

Fig. 7: a) Time signal Sensor 1: Filament rupture, b) Micro-cracking

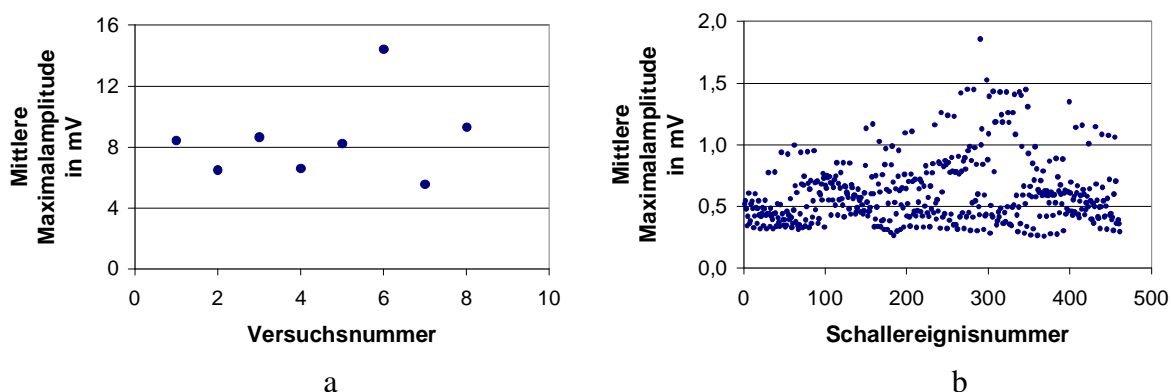


Bild 8: a) Mittlere Maximalamplitude: Filamentbruch, b) Mikroriss

Fig. 8: a) Mean maximum amplitude: Filament rupture, b) Micro-cracking

Eine weitere Möglichkeit der Charakterisierung von Signalen ist die Frequenzanalyse. Die Ähnlichkeit des Frequenzspektrums von zwei Zeitsignalen lässt sich mit der Kohärenzfunktion beschreiben. Zur Bestimmung der Kohärenzfunktion müssen die Frequenzspektren der Zeitsignale, die in digitalisierter Form vorliegen, mittels diskreter Fourier-Transformation

$$X(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \cdot e^{-i\omega_k t_n} \quad (2)$$

mit	$x(t_n)$	Zeitsignal
	$t_n = n \cdot \Delta t$	Zeit
	Δt	Zeitauflösung (Abtastintervall)
	N	Anzahl der Abtastwerte des Zeitsignals
	$\omega_k = k \cdot (2 \cdot \pi \cdot \Delta f)$	Kreisfrequenz
	mit $k = 0..N-1$	
	$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t}$	Frequenzauflösung
	$\Delta \omega = 2 \cdot \pi \cdot \Delta f$	Kreisfrequenzauflösung

berechnet werden. Mit dem Autoleistungsspektrum

$$G_{XX}(\omega_k) = X^*(\omega_k) \cdot X(\omega_k) \text{ bzw. } G_{YY}(\omega_k) = Y^*(\omega_k) \cdot Y(\omega_k) \quad (3)$$

und dem Kreuzleistungsspektrum

$$G_{XY}(\omega_k) = X^*(\omega_k) \cdot Y(\omega_k) \quad (4)$$

bei denen der Stern die komplex konjugierte Form der jeweiligen Funktionen kennzeichnet, ist die Kohärenzfunktion wie folgt definiert.

$$C_{XY}(\omega_k) = \frac{|G_{XY}(\omega_k)|^2}{G_{XX}(\omega_k) \cdot G_{YY}(\omega_k)} \quad (5)$$

Für zwei identische Signale sind Zähler und Nenner der Kohärenzfunktion gleich und man erhält über den gesamten Frequenzbereich den Wert 1. Mit größer werdendem Unterschied zwischen zwei Signalen wird die Kohärenz kleiner. Zur einfachen Beurteilung der Ähnlichkeit kann die frequenzabhängige Funktion zu einem skalaren Wert gemittelt werden. Für einen maßgebenden Frequenzbereich von f_{\min} bis f_{\max} , in dem die Signalanteile überwiegen, wird die so genannte Kohärenzsumme

$$\overline{C}_{XY} = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \cdot \sum_{\omega_k = \omega_{\min}}^{\omega_{\max}} C_{XY}(\omega_k) \cdot \Delta \omega \quad (6)$$

gebildet.

Für die aufgezeichneten Signale des Sensors 1 ist die Kohärenzsumme in Bild 9 dargestellt (ein Punkt stellt ein Schallereignis dar).

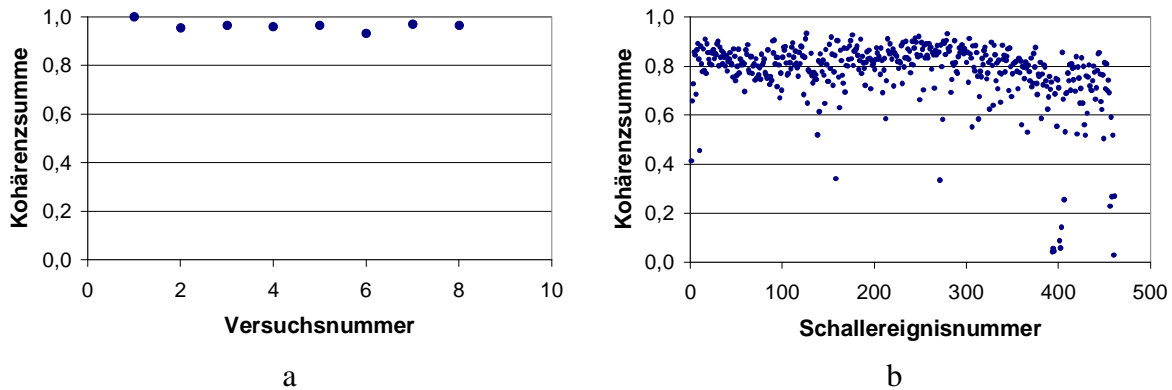


Bild 9: a) Kohärenzsumme: Filamentbruch, b) Mikroriss

Fig. 9: a) Coherence sum: Filament rupture, b) Micro-cracking

Als Referenzsignal wurde ein Signal infolge Filamentbruchs gewählt. Für zwei identische Signale ist die Kohärenzsumme gleich 1. Mit größer werdendem Unterschied zwischen zwei Signalen wird die Kohärenzsumme kleiner. Die Frequenzspektren der Filamentbrüche weisen untereinander eine hohe Ähnlichkeit auf, welche anhand der hohen Kohärenzsumme zu erkennen ist. Eine schlechtere Übereinstimmung der Frequenzcharakteristik zwischen Referenzsignal und den Signalen infolge von Mikrorissen ist zu beobachten. Jedoch findet man auch hier einige Signale, die eine ähnlich hohe Kohärenzsumme wie bei den Filamentbrüchen aufweisen.

Die Untersuchung zeigt deutlich, dass mit Hilfe der Betrachtung der Maximalamplituden eine Differenzierung der Schallemissionsursachen eindeutig möglich ist. Mit Hilfe der Frequenzanalyse ist eine Differenzierung ebenfalls möglich.

3 Analyse des Schädigungsverlaufs im Garnauszugversuch

3.1 Garnauszugversuch

Bei der Probenherstellung wird im ersten Schritt das Garn in Epoxydharz eingebettet (siehe Bild 10 a). Hierzu wird eine Gummischalung eingesetzt. Der Epoxydharzblock dient zur Lasteinleitung im Auszugversuch und gewährleistet, dass alle Filamente im Garnquerschnitt nahezu gleichmäßig herausgezogen werden. Anschließend wird das Garn mittig in den Betonprobekörper eingebettet (Bild 10 b) und nach 24 h ausgeschalt. Bis zur Prüfung wird die Probe (Bild 10 c) weitere 27 Tage bei 20 °C und 95 % r. F. gelagert.

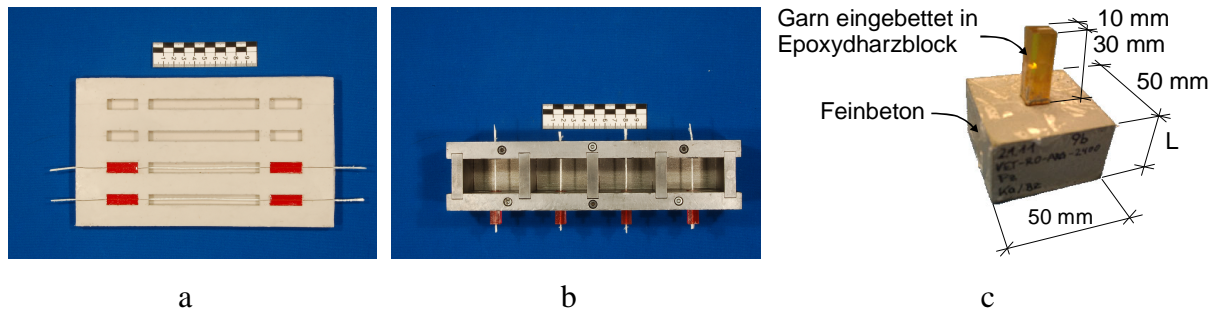


Bild 10: a) Epoxydharzeinbettung, b) Betonschalung, c) Garnauszugprobekörper

Fig. 10: a) Embedding in epoxy resin, b) Concrete mold, c) Yarn pullout specimen

Geprüft wird bei 20 °C und 65 % r. F. In Bild 11 ist die Versuchseinrichtung dargestellt. Der Epoxydharzblock, der durch ein Loch in der Stahlplatte nach unten geführt ist, wird zur Lasteinleitung geklemmt. Der Rahmen mit der Stahlplatte ist an der Traverse befestigt und wird bei der Prüfung nach oben gezogen, wodurch ein Ausziehen des Garns erfolgt. Um ein beschleunigtes Ausziehen des Garns während des Lastabfalls nach Erreichen der maximalen Auszugskraft zu vermeiden, wird der Versuch über die aufgebrachten induktiven Wegaufnehmer gesteuert. Die konstante Auszugsgeschwindigkeit wurde zu 0,05 mm/min gewählt. Für die Schallemissionsanalyse werden 8 Sensoren auf der Oberfläche des Probekörpers angebracht. In Tabelle 2 sind die Einstellungen für die Schallemissionsanalyse aufgeführt. Es wurde eine kleine Blocklänge von 2048 Samples gewählt, um eine möglichst hohe Aufzeichnungsrate zu ermöglichen. Der Triggerlevel wurde auf 0,2 V gesetzt, um von möglichen Betonmikrorissen resultierende Schallereignisse auszuschließen (siehe Bild 8b).

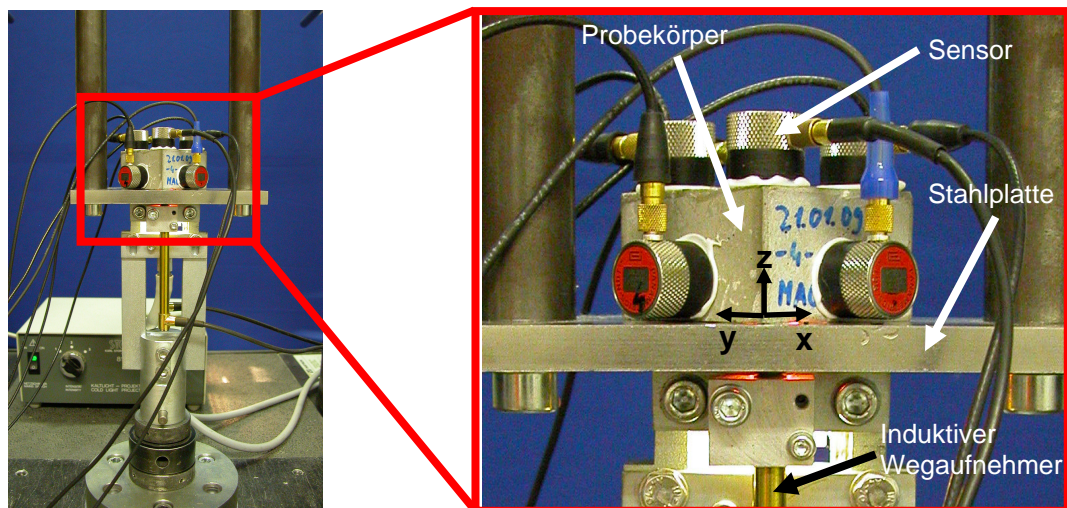


Bild 11: Versuchseinrichtung des Garnauszugversuchs

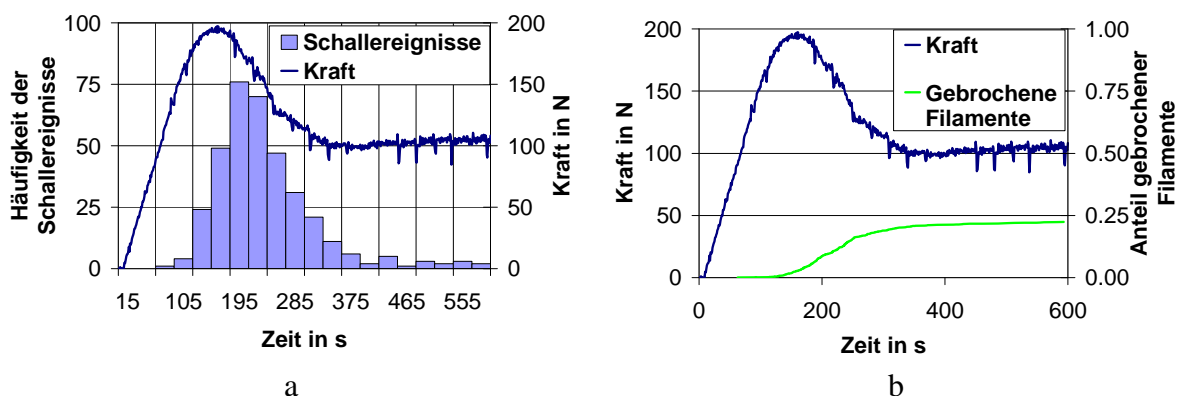
Fig. 11: Test set-up of the yarn pullout test

Tabelle 2: Einstellungen für die Schallemissionsanalyse**Table 2:** Settings for the acoustic emission analysis

Parameter	Einheit	Einstellung
Vorverstärkung	Faktor	100
Aufnahmefrequenz	MHz	10
Blocklänge	Sample	2048
Pretrigger	Sample	410
Triggerlevel	V	0,2

3.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Als Ergebnis des Auszugversuchs ist in den folgenden Bildern die Auszugskraft über die Zeit dargestellt. Während des Versuchs wurden 358 Schallereignisse aufgezeichnet. Die absolute Häufigkeit der Schallereignisse über die Zeit ist in Bild 12a dargestellt. Jedes Schallereignis wird als ein Filamentbruch interpretiert. Das Abflachen der Auszugskurve vor Erreichen der maximalen Kraft wird durch einsetzende Filamentbrüche verursacht. Während des Lastabfalls treten die meisten Filamentbrüche auf. Sukzessiv reißen die äußeren Filamente, welche eine gute Anbindung an die Betonmatrix aufweisen. Wenn nahezu alle äußeren Filamente gerissen sind, wird die Last nur noch durch die inneren Filamente über Reibung übertragen. Hierdurch resultiert eine nahezu konstante Auszugskraft über die Zeit. Vereinzelt sind noch Filamentbrüche zu beobachten, die durch ein Verkeilen einzelner Filamente während des Ausziehens verursacht werden. Dieser Effekt des Verkeilens führt hier zu einem geringen Kraftanstieg. Unter der Annahme, dass 1600 intakte Filamente am Anfang des Versuchs vorhanden sind und jedes Schallereignis einem Filamentbruch entspricht, kann die Änderung des

**Bild 12:** a) Häufigkeitsverteilung der Schallereignisse über die Zeit, b) Anteil gebrochener Filamente abhängig von der Zeit**Fig. 12:** a) Frequency distribution of the acoustic events over time, b) Fraction of broken filaments depending on time

Anteils der gebrochenen Filamente während des Versuchs ermittelt werden (siehe Bild 12b). Eine gute Korrelation zwischen Lastabfall und einer Zunahme der gebrochenen Filamente kann beobachtet werden. Am Ende des Versuchs sind etwa 22 % der Filamente gebrochen, was sich grob qualitativ am herausgezogenen Garn bestätigen lässt (siehe Bild 13b). Der überwiegende Teil der Filamente ist nicht gerissen und weist Längen in Höhe der kompletten Einbettungslänge im Beton auf. Bei der Interpretation der Schallereignisse als Filamentbrüche müssen zwei Fehlerquellen berücksichtigt werden. Zum einen werden Filamentbrüche, die in einem zeitlichen Abstand kleiner als die Signalaufzeichnungsdauer von 204,8 μs auftreten, nur als ein einziges Schallereignis erfasst. Zum anderen können während der Dauer zur Speicherung des Signals (kleiner als $\sim 700 \mu\text{s}$) keine neuen Schallereignisse aufgezeichnet werden. Da jedoch eine relativ niedrige Schallereignisrate (maximal 7 Ereignisse pro Sekunde) auftritt, ist die Wahrscheinlichkeit klein, dass die genannten Fehler auftreten.

Die Lokalisierung der aufgezeichneten Schallereignisse wurde mit dem Programm Polar^{AE}, welches am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart entwickelt wurde, bei Einsatz eines automatischen Pickalgorithmus zur Detektion der Ersteinsatzzeitpunkte der durch die Sensoren aufgezeichneten Signale durchgeführt. Die hierzu erforderliche Schallgeschwindigkeit des Probekörperbetons wurde zu 4213 m/s ermittelt. Eine eindeutige Lokalisierung kann nur dann erfolgen, wenn der zeitliche Abstand der Schallereignisse größer ist als die Signalaufzeichnungsdauer von 204,8 μs . Andernfalls resultieren große Lokalisierungsfehler durch eine Überlagerung unterschiedlicher Schallereignisse, die an unterschiedlichen Orten auftreten. Um solche Schallereignisse mit großen Lokalisierungsfehlern auszuschließen, wurden nur Lokalisierungen auf einer Basis von mindestens 6 Sensorkanälen mit einem mittleren Fehler Δx , Δy und Δz jeweils kleiner als 4 mm und mit einem Laufzeitresiduum Δt kleiner als 1 μs betrachtet. Insgesamt erfüllen 320 Schallereignisse (89,4 % von 358 Schallereignissen) diese Kriterien. In Bild 13a ist eine räumliche Darstellung der Schallereignisse dargestellt. Die Koordinatenachsen entsprechen denen im Bild 11. Auffällig ist, dass abgesehen von einem, keine Schallereignisse im Bereich der Garmlängsachse z von 0 bis ca. 7 mm auftreten. Der Grund hierfür ist, dass bei der Harzeinbettung des Garns für die Lasteinleitung auch Harz durch kapillares Saugen bis zu 5 mm in den Teil des Garns eingedrungen ist, das in den Beton eingebettet wurde. In diesem harzgetränkten Bereich tritt kein Filamentbruch auf. Die Harzeindringtiefe wurde am herausgezogenen Garn bestimmt (siehe Bild 13b). Mit zusätzlichen Ablösungen der Filamente vom Beton von 1-2 mm bis zum Erreichen der Bruchspannung im Filament ergeben sich Filamentbruchstellen z größer als ca. 7 mm. Hierbei wird angenommen, dass bei den im Beton eingebetteten Filamenten an den Übergangsstellen vom abgelösten zum verbundenen Bereich Schwachstellen bzw. Belastungserhöhungen ergeben, die dort zum Versagen führen.

Das zeitliche Auftreten der Filamentbrüche in der Garmlängsachse (z -Achse) während des Versuchs ist in Bild 14a dargestellt. Es ist tendenziell zu erkennen, dass Filamentbrüche anfangs im Bereich der Lasteinleitung (kleine z -Werte) und im Verlauf dann weiter im Inneren (größere z -Werte) auftreten.

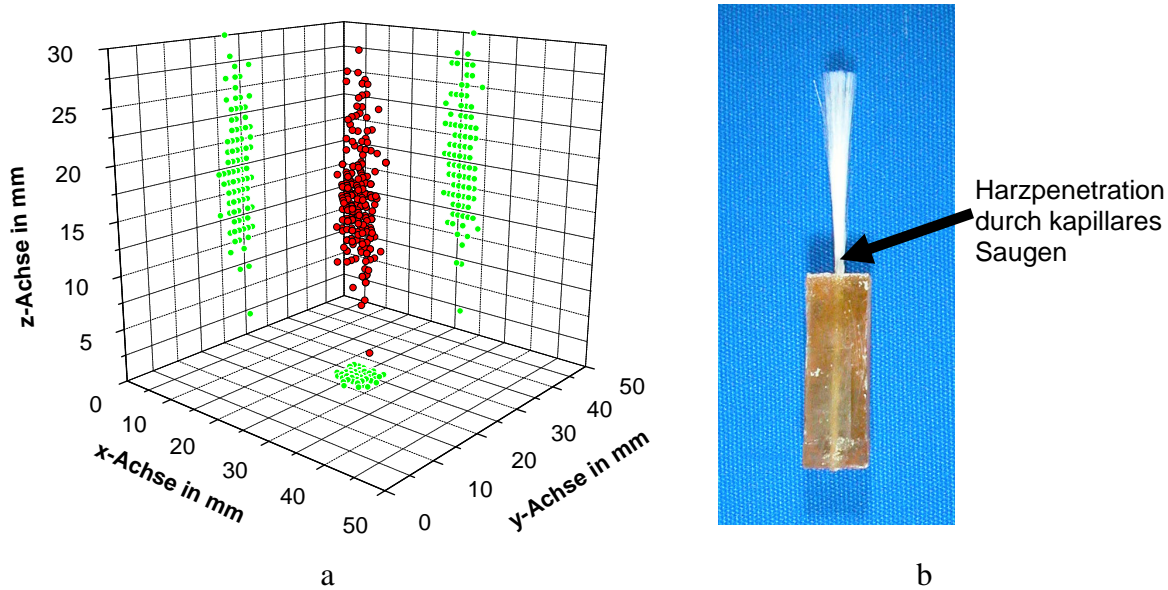


Bild 13: a) Räumliche Darstellung der Schallereignisse, b) Ausgezogenes Garn

Fig. 13: a) Spatial illustration of the acoustic events, b) Pulled-out yarn

Diese Beobachtung bestätigt das teleskopartige Versagen des Garns im Auszugversuch, bei dem die Filamente sukzessive von außen nach innen reißen. Die äußeren Filamente sind gut im Beton eingebettet und versagen als erste im Bereich der Lasteinleitung. Im Querschnitt weiter innen liegende Filamente weisen eine schlechtere, partielle Betoneinbettung auf, wodurch sich eine größere verbundfreie Länge ergibt und somit die Filamentbruchstellen tendenziell weiter im Inneren (größere z-Werte) liegen.

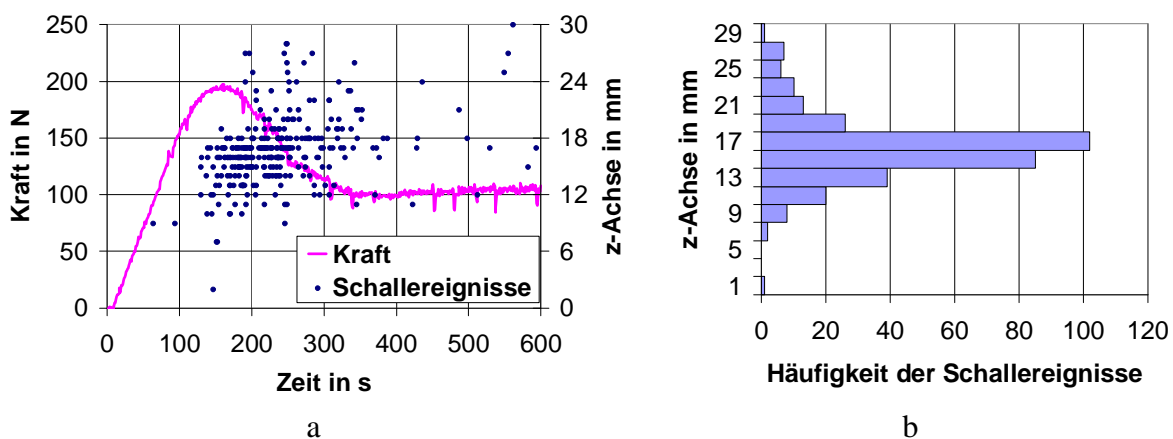


Bild 14: a) Lokalisierung der Schallereignisse in Garmlängsrichtung abhängig von der Zeit, b) Häufigkeitsverteilung der Schallereignisse über die Position auf der z-Achse

Fig. 14: a) Localisation of the acoustic events in yarn length direction depending on time, b) Frequency distribution of the acoustic events over the position on the z-axis

In Bild 14b ist die absolute Häufigkeit der Schallereignisse über die Position auf der z-Achse dargestellt. Die meisten Filamentbrüche treten in der Mitte der Einbettungslänge der Probe bei z zwischen 10 und 20 mm auf.

Die Lokalisierung ist mit Messunsicherheiten behaftet. Einflussgrößen sind z.B. die räumliche Ausdehnung der Schallemissionsquelle sowie Inhomogenitäten im Material, die zu ungleichmäßigen Schallgeschwindigkeiten führen. Die Messunsicherheit kann jedoch anhand der Laufzeitresiduen bewertet werden.

In Bild 15 ist der aus den Laufzeitresiduen resultierende Lokalisierungsfehler dargestellt. Im Mittel ergibt sich ein mittlerer Lokalisierungsfehler von 0,385 mm. Der größte Lokalisierungsfehler beträgt 1,45 mm. Somit wird deutlich, dass sich die nicht eindeutig lokalisierbaren Ereignisse (Lokalisierungsfehler größer als 4 mm) signifikant von den lokalisierten Ereignissen unterscheiden.

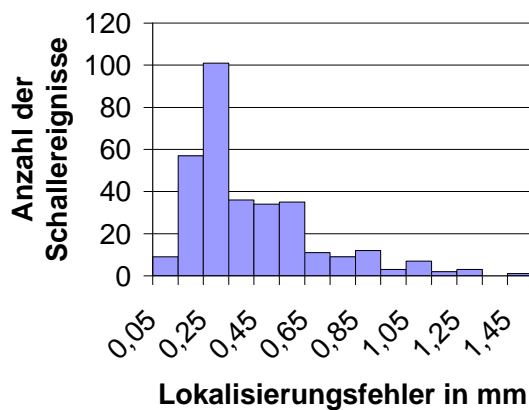


Bild 15: Lokalisierungsfehler der Schallereignisse, welche die Lokalisierungskriterien erfüllen

Fig. 15: Localisation error of the acoustic events, which fulfil the localisation criteria

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Schallemissionsanalyse wurde zur Identifizierung und Lokalisierung von Filamentbrüchen im Garnauszugversuch eingesetzt. Zur Differenzierung der Filamentbrüche von anderen Mechanismen wie die Verbundablösung oder die Mikrorissbildung im Beton wurden Versuche an in Beton eingebetteten Einzelfilamenten sowie Biegezugversuche durchgeführt, um isolierte Schallereignisse aufzunehmen. Die Charakterisierung der individuellen Signale ergab, dass die Maximalamplitude der Signale verursacht durch Filamentbrüche wesentlich größer ist als die der Signale anderer Mechanismen.

Im Garnauszugversuch wurde der Triggerschwellwert dann so gesetzt, dass nur Filamentbrüche aufgezeichnet werden. Während des Garnauszugversuchs wurden 358 Schallereignisse

aufgezeichnet. Die meisten Schallereignisse (Filamentbrüche) treten nach Erreichen der maximalen Auszugskraft auf und sind verantwortlich für den Lastabfall.

320 automatisch lokalisierte Schallereignisse erfüllen die in Abschnitt 3.2 definierten Kriterien, die einen großen Lokalisierungsfehler ausschließen. Das teleskopartige Versagen konnte anhand der Lokalisierung der Filamentbrüche nachvollzogen werden. Die meisten Schallereignisse (Filamentbrüche) treten in der Mitte der Garneinbettungslänge auf. Für diese 320 Schallereignisse liegt ein sehr kleiner mittlerer Lokalisierungsfehler von 0,385 mm vor.

Mit Hilfe der vorgestellten Methode können Simulationsrechnungen validiert und somit Modelle, die textilbewehrten Beton abbilden, verifiziert werden.

Um grundsätzlich zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse richtig sind, sollen die herausgezogenen, nicht gerissenen Filamente mit Hilfe der Bildanalyse ausgezählt werden. Dazu soll das herausgezogene Garn in Harz eingebettet werden. Anschließend soll mit Hilfe der Mikroskopie ein Garnquerschnitt für die Bildanalyse aufgenommen werden.

Zur Validierung der Filamentbruchlokalisierungen ist es denkbar, die herausgezogenen Filamentlängen auszumessen. Jedoch liegt bislang kein Verfahren vor, welches die Längenmessung für alle Filamente automatisch durchführt.

Des Weiteren kann mit Hilfe der Schallemissionsanalyse die Schädigungsakkumulation bei Versuchen mit zyklischer und konstanter Langzeitbelastung, bei denen eine noch geringere Bruchrate zu erwarten ist und somit gleichzeitig auftretende Filamentbrüche noch unwahrscheinlicher werden, detailliert verfolgt werden.

5 Literatur

- [1] BANHOLZER, B.: *Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn Embedded in a Cementitious Matrix*. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2004), No. 12, Dissertation.
- [2] REINHARDT, H.W.; KRÜGER, M.; GROBE, C.U.: Concrete Prestressed with Textile Fabric. In: *Journal of Advanced Technology* 1 (2003), No. 3, pp. 231-239.
- [3] KÖPPEL, S.: *Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken*. ETH Zürich (2002), Diss.ETH Nr. 14490, Dissertation.
- [4] KANG, B.-G.; BANHOLZER, B.; BRAMESHUBER, W.: Experimental Characterisation of the Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn Embedded in Fine-Grained Concrete Matrix. Lyon: Universite Lyon I, Laboratoire Mecanique Materiaux et Structures, 2005. - In: *Composites in Constructions, the Third International Conference, Lyon, France, July 11 - 13, 2005* (HAMELIN, P.; BIGAUD, D. et al (Ed.)), Vol. 2, S. 1283-1290.

- [5] BROCKMANN, T.: Anforderungen und Eigenschaften zementgebundener Feinbetone (Properties of cement based fine-concrete). Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2001.- In: *Textilbeton. 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532, 15. und 16. Februar 2001 in Aachen* (HEGGER, J. (Hrsg.)), S. 82-98.